

**РЕФОРМА SI: ПРИЧИНИ, СУТЬ, ОЧІКУВАНІ НАСЛІДКИ**

**Павленко Ю. Ф.<sup>1)</sup>, Кондрашов С. І.<sup>2)</sup>, Дроздова Т. В.<sup>2)</sup>**

**<sup>1)</sup> ННЦ «Інститут метрології», вул. Мироносицька, 42,  
м. Харків, Україна, 61002**

**<sup>2)</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний  
інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002**

Хоча Міжнародна система одиниць SI існує багато років і довела свою життєвість, вона постійно розвивається і уточнюється. Основною тенденцією цих змін є наближення визначень одиниць до природних інваріантів і посилення зв'язку з фундаментальними сталими як істинними еталонами природи.

На початку XXI ст. стан з системою SI склався такий, що з семи основних одиниць тільки секунда і метр напряму пов'язані з істинними інваріантами, оскільки секунда визначається через період, що відповідає частоті надтонкого переходу цезію-133, а метр – через швидкість світла у вакуумі. Одиниця сили світла кандела хоч і не прив'язана до фундаментальної сталої, але її можна розглядати як таку, що спирається на природний інваріант – спектральну силу світлового потоку монохроматичного випромінювання з частотою  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, яка точно дорівнює 683 лм/Вт. Кельвін визначається на основі точно заданого термодинамічного стану води, яке хоч і є природним інваріантом, але має термодинамічну температуру, значною мірою залежну від вмісту домішок та ізотопного складу даного об'єму води. Це ускладнює ситуацію і обмежує точність, з якою це визначення може бути реалізовано.

Визначення інших основних одиниць має ще більш серйозні недоліки. Кілограм досі визначається за допомогою «артефакту» – того самого прототипу, прийнятого 1-ю Генеральною конференцією з мір та ваг у 1889 р. Його маса, як відомо, дрейфує по відношенню до істинного інваріанту, однак цей дрейф фактично неможливо оцінити, оскільки всі зразки цієї гирі були відлиті з одного сплаву в одній плавці і на одному підприємстві, тобто дрейфують в «одному напрямку». Суттєві недоліки має діюче сьогодні визначення ампера. Недоліки визначення моля і кандели, в основному, полягають в їх залежності від визначення кілограма, хоча мають місце й інші проблеми.

Сукупність цих факторів призвела до того, що 23-тя CGPM (2007 р.) прийняла Резолюцію 12 «Про можливе перевизначення певних основних одиниць Міжнародної системи SI», 24 CGPM у 2011 р. у резолюції № 1 сформулювала ці нові визначення, а також суть “Нової SI” (New SI), а 25

CGPM (2014 р.) підтвердила ці рішення. І от нарешті 26 CGPM 16 листопада 2018 р. прийняла остаточне рішення про введення в дію Нової СІ з травня 2019 року.

### **Суть змін, що вносяться до СІ. «Нова» СІ.**

Міжнародна система одиниць New SI буде системою одиниць, в якій:

- частота надтонкого розщеплювання атома цезію-133 в основному стані  $\nu_{Cs}$  складає точно 9 192 631 770 Гц;
- швидкість світла у вакуумі  $c_0$  складає точно 299 792 458 м с<sup>-1</sup>;
- стала Планка  $h$  складає точно  $6,626\,06X \times 10^{-34}$  Дж·с;
- елементарний заряд  $e$  складає точно  $1,602\,17X \times 10^{-19}$  с А або Кл;
- стала Больцмана  $k$  складає точно  $1,380\,6X \times 10^{-23}$  Дж К<sup>-1</sup>;
- стала Авогадро  $N_A$  складає точно  $6,022\,14X \times 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>;
- світлова ефективність  $K_{cd}$  монохроматичного випромінювання з частотою  $540 \times 10^{12}$  Гц складає точно 683 лм/Вт,

де символ  $X$  є однією або декількома цифрами, які потрібно додати до числових значень  $h$ ,  $e$ ,  $k$  і  $N_A$ , з використанням найостаннішого коректування Комітета з числових даних для науки і техніки (CODATA).

У Новій СІ введено нові визначення всіх основних одиниць. Їх аналіз і порівняння з існуючими в СІ на цей час показує, що для секунди, метра і канделі змінюються лише формулювання (через сталі), що ніяк не впливає на їх суть і методи відтворення. Принциповою є ситуація з кілограмом, який буде простежуватись до сталої Планка і відтворюватись через фізичний експеримент через електричні вимірювання. Звідси і його неофіційна назва – «електричний кілограм».

Щодо нового визначення ампера (через елементарний заряд) – воно лише офіційно фіксує ситуацію, яка вже склалась в електричній метрології – відтворення одиниць на основі макроскопічних квантових ефектів.

В температурних вимірюваннях замість опори на потрібну точку води вводиться простежуваність кельвіна до сталої Больцмана. Але, як вважають провідні метрологи в цій галузі, МТШ-90, на якій ґрунтуються температурні вимірювання сьогодні, ще довгий час зберігатиме своє значення, але перестане бути єдиною опорою.

Причиною перевизначення моля є прагнення прив'язати всі одиниці до фундаментальних фізичних сталих.

В основі відтворення більшості основних одиниць (табл.1) будуть лежати квантові макроскопічні ефекти (квантовий перехід в цезії, ефект Джозефсона, квантовий ефект Холла, ефект одноелектронного тунелювання), які дозволяють забезпечити простежуваність до фундаментальних фізичних сталих. Також поставлено завдання створення «квантової» канделі, що може бути досягнуто при гарантованому маніпулюванні окремими фотонами в режимах генерування і прийому (детектування), тобто при освоєнні технології надійного однофотонного тунелювання.

Таблиця 1 – Відтворення основних одиниць у Новій СІ

Основна одиниця	Стала, до якої простежується одиниця	Метод відтворення	Основна апаратура
Секунда	$\nu_{cs}$ – частота переходу поміж надтонкими рівнями атому цезію-133	Квантовий перехід в цезії-133	Цезієвий репер
Метр	$c$ – швидкість світла	Генерування когерентного світлового випромінювання (за допомогою лазера) і вимірювання частоти лазера; $L = c/f_L$	Високостабільний лазер і вимірювач його частоти (РОЧМ)
Ампер	$e$ – елементарний заряд	1. Закон Ома і квантові ефекти Джозефсона і Холла; $I = \frac{U_J}{R_X - \text{Холлівський опір}}$	1. Прилади Джозефсона і КЕХ, струмовий компаратор
		2. Одноелектронне тунелювання	2. SET-насос
Кілограм	$h$ – стала Планка	Порівняння $P_{\text{ел}} = P_{\text{мех}}$ , вимірювання $P_{\text{ел}}$ через квантові ефекти Джозефсона і Холла	Ватт-ваги, прилади Джозефсона і КЕХ
Кельвін	$k$ – стала Больцмана	Методи первинної термометрії	Первинні термометри
Кандела	$k(\lambda_{555})$ – спектральна сила світла частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц	1. Властивості випромінювання абсолютно чорного тіла	Випромінювач типу АЧТ
		2. Використання явища фотоефекту	Приймач-фотометр зі 100%-вою квантовою ефективністю
Моль	$N_A$ – стала Авогадро	Еталон не створюється	—

### Наслідки введення Нової СІ.

1. Система одиниць позбавляється останнього еталона-артефакту (платино-іридієвого кілограма) і стає дійсно природною системою.

2. Визначення ампера буде, нарешті, відповідати методиці його практичної реалізації – через квантові ефекти, що «розставляє все на свої місця» і позбавляє систему електричних одиниць дуалізму.

3. Перехід на визначення кельвіна через сталу Больцмана приведе до удосконалення методів первинної термометрії, що важливо для розвитку температурних і теплових вимірювань в цілому.

4. Ряд сталих набувають точних значень, що важливо для науки в цілому.

5. Зміни в СІ не ведуть до суттєвих наслідків в процедурах і результатах практичної метрології, але будуть сприяти подальшому впровадженню більш точних методів, зокрема, квантових, у нижчі поверхи метрологічної ієрархії і виробничу діяльність

6. Оскільки за нових визначень будь-яка одиниця простежується не до первинного еталона, а до сталої і в принциповому плані може бути відтворена в будь-якій точці Землі з фундаментальною точністю, знижується необхідність у створенні складних систем передавання розмірів одиниць. Можлива поступова децентралізація систем забезпечення єдності вимірювань з епізодичними звіреннями еталонів для підтвердження достовірності.